

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6168582号  
(P6168582)

(45) 発行日 平成29年7月26日(2017.7.26)

(24) 登録日 平成29年7月7日(2017.7.7)

(51) Int. Cl. F 1  
**G 2 1 C 17/06 (2006.01)**  
 G 2 1 C 17/06 F  
 G 2 1 C 17/06 E

請求項の数 8 (全 14 頁)

(21) 出願番号	特願2012-189610 (P2012-189610)	(73) 特許権者	507250427 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 茨城県日立市幸町三丁目1番1号
(22) 出願日	平成24年8月30日(2012.8.30)	(73) 特許権者	505374783 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地 1
(65) 公開番号	特開2014-48089 (P2014-48089A)	(74) 代理人	110000350 ポレール特許業務法人
(43) 公開日	平成26年3月17日(2014.3.17)	(72) 発明者	清川 省吾 茨城県日立市幸町三丁目1番1号 日立GE ニュークリア・エナジー株式会社内
審査請求日	平成27年3月4日(2015.3.4)	(72) 発明者	丸山 博見 茨城県日立市幸町三丁目1番1号 日立GE ニュークリア・エナジー株式会社内 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 核燃料物質の臨界監視方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

原子力プラントの系統内に蓄積された核燃料物質から放出される 線を検出し、前記線の検出により得られた線計数率を用いて線スペクトル情報を作成し、前記蓄積された核燃料物質の重量を表す第1情報を、前記線スペクトル情報に含まれるEu-154のピークの線計数率に基づいて求め、前記核燃料物質から放出される中性子を検出し、前記中性子の検出により得られた中性子計数率を用い、データ処理装置で、中性子逆増倍法により、中性子実効増倍率の逆数を求め、前記核燃料物質が前記系統内に蓄積されるに伴って、前記重量を表す第1情報及びこの重量を表す第1情報に対応する前記中性子実効増倍率の逆数が複数組求められ、前記データ処理装置により、求められた前記複数組の重量を表す第1情報及び前記中性子実効増倍率の逆数に基づいて、前記重量を表す第1情報と前記中性子実効増倍率の逆数との関係を表す逆増倍曲線を求め、前記逆増倍曲線を用いて、臨界点で蓄積される前記核燃料物質の重量を表す第2情報を求めることを特徴とする核燃料物質の臨界監視方法。

【請求項2】

前記蓄積された核燃料物質の重量を表す第1情報が前記蓄積された核燃料物質の第1重量であり、前記臨界点で蓄積される前記核燃料物質の重量を表す第2情報が、前記臨界点で蓄積さ

10

20

れる前記核燃料物質の第2重量である請求項1に記載の核燃料物質の臨界監視方法。

【請求項3】

前記第1重量は、前記線スペクトル情報に含まれるEu-154のピークの線計数率に基づいてEu-154の重量を求め、求めた前記Eu-154の重量を前記核燃料物質に含まれるEu-154の割合で割ることによって求められる請求項2に記載の核燃料物質の臨界監視方法。

【請求項4】

或る測定時点で求められた前記核燃料物質の前記第1重量が、前記核燃料物質の前記第2重量よりも少ない前記核燃料物質の設定重量よりも少ないかを判定する請求項2または3に記載の核燃料物質の臨界監視方法。

10

【請求項5】

前記第1重量が前記設定重量以上になったとき、警報情報が発生する請求項4に記載の核燃料物質の臨界監視方法。

【請求項6】

前記第1重量が前記設定重量以上になったとき、前記核燃料物質が蓄積されている前記系統内に中性子吸収材を含む溶液を注入する請求項4に記載の核燃料物質の臨界監視方法。

【請求項7】

前記蓄積された核燃料物質は、原子炉压力容器内に装荷された燃料棒から前記原子炉压力容器内の冷却水中に漏えいした核燃料物質である請求項1ないし6のいずれか1項に記載の核燃料物質の臨界監視方法。

20

【請求項8】

前記中性子計数率が設定中性子計数率以下であるときに前記中性子計数率を平均化する第1統計時間を、前記中性子計数率が前記設定中性子計数率よりも大きいときに前記中性子計数率を平均化する第2統計時間よりも長くする請求項1ないし7のいずれか1項に記載の核燃料物質の臨界監視方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、核燃料物質の臨界監視方法に係り、特に、原子力プラントに適用するのに好適な核燃料物質の臨界監視方法に関する。

30

【背景技術】

【0002】

原子炉で使用された使用済の燃料集合体、すなわち、照射燃料集合体を燃料貯蔵ラック、燃料輸送貯蔵容器に収納する過程において臨界安全性を確保するための照射燃料集合体装荷未臨界体系の実効増倍率測定方法の一例が、特開平5-288888号公報に記載されている。この実効増倍率測定方法では、その未臨界体系の未臨界度が評価される。すなわち、中性子発生率、照射燃料集合体装荷未臨界体系の形状寸法及び群定数を与えて行う中性子輸送・拡散計算の固定源モード計算において、燃料領域の核分裂断面積を零とした計算を追加し、2つの中性子束計算値を用いて、中性子検出器の測定位置で実際に中性子束計数率を測定評価している場所に対応した実効増倍率を測定評価している。

40

【0003】

特開平5-288888号公報に記載された未臨界度測定方法は、既知の核燃料物質に対するものである。これに対し、核燃料再処理施設の溶解層及び配管内に存在する処理液に含まれる核燃料物質の未臨界度の測定が、特開昭58-45599号公報、特開昭62-277595号公報及び特開昭62-2944998号公報に記載されている。

【0004】

特開昭58-45599号公報は、核燃料再処理施設の処理液が流れる配管に、中性子増倍率が小さくなるようにした流路を並列または直列に設け、この流路における中性子計数率を用いて、配管の中性子計数率から配管内を流れる処理液中の自発中性子放出核種の

50

濃度変化の効果を除去する未臨界度監視方法を記載している。

【 0 0 0 5 】

特開昭 6 2 - 2 7 7 5 9 5 号公報に記載された核燃料物質存在領域の未臨界度監視方法では、処理液が流れる配管に中性子実効増倍率評価部及び中性子束計測部を形成し、中性子束計測部を取り囲んで測定用中性子反射体を配置し、中性子束計測部と測定用中性子反射体の間に熱中性子吸収体を配置した部分で測定用中性子反射体の外側に第 1 中性子検出器を配置し、中性子束計測部と測定用中性子反射体の間に熱中性子吸収体を配置していない部分で測定用中性子反射体の外側に第 2 中性子検出器を配置した中性子束測定部構造を用いている。そして、第 1 中性子検出器で計測された中性子束と第 2 中性子検出器で計測された中性子束の比を求め、この比を用いて求めた中性子束計測部の実効増倍率に基づいて、中性子実効増倍率評価部における未臨界度を監視する。

10

【 0 0 0 6 】

特開昭 6 2 - 2 9 4 4 9 9 8 号公報に記載された未臨界度の測定方法では、核分裂性物質及び自発中性子を放出する核種を有する核燃料物質を含む処理液が存在する、核燃料再処理施設の溶解槽及び配管等の形状が異なる複数の部位で中性子を計測し、これらの部位で計測された中性子計数率の比に基づいて中性子実効増倍率を算出している。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 7 】

【 特許文献 1 】 特開平 5 - 2 8 8 8 8 8 号公報

20

【 特許文献 2 】 特開昭 5 8 - 4 5 5 9 9 号公報

【 特許文献 3 】 特開昭 6 2 - 2 7 7 5 9 5 号公報

【 特許文献 4 】 特開昭 6 2 - 2 9 4 4 9 9 8 号公報

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 8 】

例えば、原子力プラントにおいて事故が発生し、原子炉内からの循環水に核燃料物質が混入している場合を想定する。このような循環水を浄化するためには、核燃料物質の流入を防止するストレーナ部の設置、または核燃料物質に含まれる放射性核種を取り除く吸着材層の設置が必要である。また、配管の曲り部等に核燃料物質が多量に蓄積する可能性がある。核燃料物質を含む水が流れる上記したストレーナ部、吸着材層または曲り部等において局部的に核燃料物質が多量に蓄積された状態では、核燃料物質の再臨界の可能性があるため、蓄積された核燃料物質の量を検出する必要がある。

30

【 0 0 0 9 】

このような蓄積された核燃料物質の未臨界度の測定に、特開昭 5 8 - 4 5 5 9 9 号公報、特開昭 6 2 - 2 7 7 5 9 5 号公報または特開昭 6 2 - 2 9 4 4 9 9 8 号公報に記載された未臨界度の測定方法を適用することが考えられる。これらの未臨界度の測定方法は、中性子計数率を測定してこの測定された中性子計数率に基づいて蓄積された核燃料物質の未臨界度を測定している。しかしながら、中性子計数率に基づいて、原子力プラント内の或る箇所に蓄積された核燃料物質の臨界を精度良く監視することができない。

40

【 0 0 1 0 】

本発明の目的は、核燃料物質を含む液体が流れる系統内で蓄積された核燃料物質の未臨界状態をより精度良く監視することができる核燃料物質の臨界監視方法を提供することにある。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 1 】

上記した目的を達成する本発明の特徴は、原子力プラントの系統内で蓄積された核燃料物質の第 1 量を求め、その核燃料物質から放出される中性子を検出し、この中性子の検出により得られた中性子計数率を用い、データ処理装置で、中性子逆増倍法により、中性子実効増倍率の逆数を求め、そのデータ処理装置により、求められた第 1 量及び中性子実効

50

増倍率の逆数に基づいて臨界点で蓄積される核燃料物質の第 2 量を算出することにある。

【 0 0 1 2 】

求められた核燃料物質の第 1 量及び中性子実効増倍率の逆数に基づいて臨界点で蓄積される核燃料物質の第 2 量を算出するので、核燃料物質の第 2 量を精度良く算出することができる。このため、核燃料物質を含む液体が流れる系統内で蓄積された核燃料物質の未臨界状態をより精度良く監視することができる。

【発明の効果】

【 0 0 1 3 】

本発明によれば、核燃料物質を含む液体が流れる系統内で蓄積された核燃料物質の未臨界状態をより精度良く監視することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 4 】

【図 1】本発明の好適な一実施例である実施例 1 の核燃料物質の臨界監視方法に用いられる臨界監視装置の構成図である。

【図 2】核燃料物質の線スペクトル分布の一例を示す説明図である。

【図 3】核燃料物質の重量に対する中性子計数率の関係を示す特性図である。

【図 4】実施例 1 に適用される中性子逆増倍率法の概念を示す説明図である。

【図 5】本発明の他の実施例である実施例 2 の核燃料物質の臨界監視方法に用いられる臨界監視装置の構成図である。

【図 6】本発明の他の実施例である実施例 3 の核燃料物質の臨界監視方法に用いられる臨界監視装置の構成図である。

20

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 5 】

本発明の実施例を以下に説明する。

【実施例 1】

【 0 0 1 6 】

本発明の好適な一実施例である実施例 1 の核燃料物質の臨界監視方法を、図 1 を用いて説明する。

【 0 0 1 7 】

本実施例の核燃料物質の臨界監視方法に用いられる臨界監視装置 1 は、He-3 比例計数管（中性子検出装置）2、LaBr<sub>3</sub>（Ce）検出器（線検出装置）3、データ処理装置 4 及び表示装置 5 を有する。He-3 比例計数管 2 及び LaBr<sub>3</sub>（Ce）検出器 3 はデータ処理装置 4 に接続される。表示装置 5 はデータ処理装置 4 に接続される。線検出装置として、LaBr<sub>3</sub>（Ce）検出器の替りに、CdTe 半導体検出器、Ge（Li）半導体検出器等の半導体放射線検出器、または NaI（Tl）検出器等のシンチレータを用いても良い。

30

【 0 0 1 8 】

原子力プラントにおいて、原子炉に接続された配管 10 内を流れる冷却水 12 に核燃料物質が流出する事故が発生する場合を想定して、その配管 10 内には、ストレーナ 11 が設置される。上記の事故が発生した場合において、このストレーナ 11 により配管 10 内を流れる冷却水 12 に含まれる核燃料物質 13 が除去される。除去された核燃料物質 13 はストレーナ 11 内に蓄積される。ストレーナ 11 の替りに核燃料物質に含まれる放射性核種を吸着する吸着材層を配管 10 に設けてもよい。

40

【 0 0 1 9 】

臨界監視装置 1 はストレーナ 11 で除去されてストレーナ 11 内に蓄積された核燃料物質 13 の臨界を監視する装置であり、He-3 比例計数管 2 及び LaBr<sub>3</sub>（Ce）検出器 3 がストレーナ 11 の設置位置で配管 10 の外側に配置される。配管 10 内を流れる冷却水 12 に核燃料物質が流出する事故が発生したとき、臨界監視装置 1 に接続される電源のスイッチが ON され、He-3 比例計数管 2、LaBr<sub>3</sub>（Ce）検出器 3、データ処理装置 4 及び表示装置 5 に電流が供給される。このため、He-3 比例計数管 2、LaBr

50

$r_3$  (Ce) 検出器 3、データ処理装置 4 及び表示装置 5 が起動される。

【0020】

ストレーナ 11 内に蓄積された核燃料物質の重量が増大すると、ストレーナ 11 内の核燃料物質が局部的に再臨界になる可能性がある。このため、ストレーナ 11 内での臨界近接を予測する必要がある。ストレーナ 11 に蓄積された核燃料物質の臨界が、臨界監視装置 1 により監視される。臨界監視装置 1 を用いた未臨界度の測定を以下に詳細に説明する。

【0021】

ストレーナ 11 内に蓄積された核燃料物質 13 から放出された  $\gamma$  線は、LaBr<sub>3</sub> (Ce) 検出器 3 によって検出される。LaBr<sub>3</sub> (Ce) 検出器 3 は、 $\gamma$  線を検出することによって  $\gamma$  線検出信号を出力する。この  $\gamma$  線検出信号は、データ処理装置 4 に入力される。データ処理装置 4 は、入力した  $\gamma$  線検出信号の計数率 ( $\gamma$  線計数率) を求め、得られた  $\gamma$  線計数率を用いて  $\gamma$  線スペクトル分布を求める。この  $\gamma$  線スペクトル分布の一例を図 2 に示す。 $\gamma$  線スペクトル分布は、ストレーナ 11 内に蓄積された核燃料物質の成分物質、例えば、Cs - 137, Cs - 134 及び Eu - 154 に対応するピーク毎の  $\gamma$  線計数率を含んでいる。この  $\gamma$  線スペクトル分布は、さらに、パルサ信号 20 を含んでいる。

10

【0022】

データ処理装置 4 は、 $\gamma$  線スペクトル分布に基づいて、後述する中性子計数率と共に臨界近接の予測に用いる指標である蓄積された核燃料物質の重量を算出する。この核燃料物質の重量の算出は、 $\gamma$  線スペクトル分布における或る一つのピークの  $\gamma$  線計数率 (例えば、Cs - 137) に基づいて求められる。Cs - 137 のピークの  $\gamma$  線計数率に基づいてストレーナ 11 内に蓄積された核燃料物質 13 の重量を求める場合には、Cs - 137 のピークの  $\gamma$  線計数率に基づいて求めた重量を、この核燃料物質 13 に含まれる Cs - 137 の比率で割ればよい。

20

【0023】

ストレーナ 11 内に蓄積された核燃料物質から放出される中性子は、He - 3 比例計数管 2 により検出される。この中性子は、主に、核燃料物質に含まれるキュリウム (Cm) の自発核分裂により発生する。He - 3 比例計数管 2 は、中性子を検出することによって中性子検出信号を出力する。データ処理装置 4 は、入力した中性子検出信号に基づいて中性子計数率を求める。この中性子計数率は、ストレーナ 11 内に核燃料物質が蓄積される初期段階では、値が小さく、ストレーナ 11 内に蓄積された核燃料物質の重量に比例して増加する (図 3 参照)。時間が経過してストレーナ 11 内に蓄積された核燃料物質の重量が或る量 (図 3 に示す矢印 22 の位置での核燃料物質の重量) まで増加したとき、中性子計数率は、増倍の効果が加わって、図 3 に示すように急激に増加する。

30

【0024】

上記の事故が発生して He - 3 比例計数管 2 が起動された直後、すなわち、上記した初期段階では、上記したように、中性子計数率が小さい状態が継続される。ストレーナ 11 内に蓄積された核燃料物質が矢印 22 で示される核燃料物質の重量まで増加して臨界近接の状態になったときに、He - 3 比例計数管 2 から出力された中性子検出信号に基づいて求められた中性子計数率は大きくなる。このため、データ処理装置 4 は、矢印 22 で示される核燃料物質の重量に対応する中性子計数率 (以下、設定中性子計数率という) 以下の低い中性子計数率のときには、中性子計数率を平均化する統計時間を長くとり、設定中性子計数率を超える高い中性子計数率のときには、その統計時間を短くする。これにより、データ処理装置 4 で求める中性子計数率の平均値の統計誤差を同程度にし、かつ、高計数率での速応答性を確保することができる。なお、設定中性子計数率は、核燃料物質の重量の増加に伴って中性子計数率の増加度合いが変化する時点での中性子計数率の値である。

40

【0025】

データ処理装置 4 は、求められた中性子計数率を用いて、中性子逆増倍法によりストレーナ 11 に蓄積された核燃料物質 13 の臨界点を求める。

【0026】

50

一般的な中性子逆増倍法は、中性子測定装置から出力された中性子検出信号に基づいて求められた中性子計数率を用いて計算される中性子実効増倍率の逆数（ $1/M$ ）を、例えば、炉心に装荷された核燃料物質の重量を指標として、図4に示すように、測定ステップ（ステップ1及びステップ2等）ごとにプロットして曲線（以下、逆増倍曲線という）を求め、得られた逆増倍曲線を外挿することによって臨界になる（ $1/M=0$ ）ために必要な核燃料物質の重量（予測臨界量）を推定する方法である（図4参照）。中性子逆増倍法を用いることによって、臨界超過に達する前において臨界点（ $1/M=0$ ）までの余裕を定量的に計算・予測できるため、予期せぬ臨界超過の危険性を未然に回避することができる。従来、中性子実効増倍率の逆数の指標として、核燃料物質の重量及び濃度、減速材及び反射体の量、制御棒の位置、及びホウ酸濃度などの明確な測定値データが用いられている。

10

## 【0027】

本実施例では、ストレーナ11内に蓄積された核燃料物質13の重量を表す情報、例えば、LaBr<sub>3</sub>(Ce)検出器3から出力された線検出信号を用いて求められた線スペクトル分布に含まれた或るピークの線計数率（例えば、Cs-137のピークの線計数率）を用いている。また、本実施例では、外部中性子源を用いずに、蓄積された核燃料物質13に含まれる自発核分裂性物質であるキュリウムを中性子源としているので、中性子源の強度が変動する。

## 【0028】

本実施例で用いられる中性子逆増倍法について説明する。配管10内を流れる冷却水12に含まれる核燃料物質13がストレーナ11に捕捉されると、ストレーナ11内に蓄積される核燃料物質13の重量が増加し、これに伴って、ストレーナ11内の核燃料物質13に含まれるキュリウム（中性子源）の重量も増加する。このため、ストレーナ11内の核燃料物質13に含まれる中性子源（キュリウム）の強度が変化するため、本実施例で用いられる中性子逆増倍法は、前述した一般的な中性子逆増倍法とは原理が同じであるが計算式が異なっている。本実施例で用いる中性子逆増倍法の計算式を以下に説明する。

20

## 【0029】

中性子計数率 $C$ と中性子実効増倍率 $k_{eff}$ の間には、式(1)に示す関係がある。

## 【0030】

## 【数1】

$$C = \varepsilon \cdot (S + k_{eff}S + k_{eff}^2S + \dots) = \frac{\varepsilon S}{1 - k_{eff}} \quad \dots (1)$$

30

## 【0031】

ここで、 $S$ は或る測定時点 $t$ における、蓄積された核燃料物質に含まれる中性子源の強度、及び $\varepsilon$ は中性子検出効率である。

## 【0032】

起点となる時点 $t_0$ （例えば、中性子の測定開始時点）で中性子計数率 $C_0$ が得られたとし、このときの中性子増倍率を $k_0$ とすると、中性子計数率 $C_0$ は式(2)で表される。

40

## 【0033】

## 【数2】

$$C_0 = \frac{\varepsilon S_0}{(1 - k_0)} \quad \dots (2)$$

## 【0034】

ここで、 $S_0$ は起点となる時点 $t_0$ （例えば、中性子の測定開始時点）における、蓄積された核燃料物質に含まれる中性子源の強度である。中性子検出効率 $\varepsilon$ は、中性子検出装置の測定条件を変更しないと仮定し、一定とする。式(2)を変形すると、式(3)が得られる。

50

【 0 0 3 5 】

【数 3】

$$k_{\text{eff}} = 1 - \frac{C_0}{C} \frac{S}{S_0} (1 - k_0) = 1 - \frac{1}{M} \quad \dots (3)$$

【 0 0 3 6 】

1 / M は、式 ( 3 ) を変形することによって式 ( 4 ) のように表される。

【 0 0 3 7 】

【数 4】

$$\frac{1}{M} = \frac{C_0}{C} \frac{S}{S_0} (1 - k_0) = 1 - k_{\text{eff}} \quad \dots (4)$$

10

【 0 0 3 8 】

He - 3 比例計数管 2 から出力された中性子検出信号に基づいてデータ処理装置 4 において求められた中性子計数率を用いた中性子実効増倍率の逆数 1 / M の算出について説明する。式 ( 4 ) の中性子計数率 C には起点となる時点  $t_0$  から時間が経過した或る測定時点 t で He - 3 比例計数管 2 から出力された中性子検出信号に基づいてデータ処理装置 4 により求められた中性子計数率を代入し、式 ( 4 ) の中性子計数率  $C_0$  には起点となる時点  $t_0$  で He - 3 比例計数管 2 から出力された中性子検出信号に基づいてデータ処理装置 4 により求められた中性子計数率を代入する。従来の方法では、固定線源を用いるために、式 ( 4 ) に示された、起点となる時点  $t_0$  から時間が経過した或る測定時点 t における中性子源強度 S に、固定値を代入していた。しかしながら、本実施例では、ストレナ 1 1 に蓄積される濃縮度が未定の核燃料物質 1 3 に含まれる自発核分裂性物質を中性子源とするために、中性子源強度 S が以下に述べる二つの方法のいずれかにより算出される。

20

【 0 0 3 9 】

中性子源強度 S を求める第一の方法は、起点となる時点  $t_0$  における、蓄積された核燃料物質に含まれる中性子源の強度  $S_0$  に対する、起点となる時点  $t_0$  から時間が経過した或る測定時点 t における、蓄積された核燃料物質に含まれる中性子源の強度 S の比 (  $S / S_0$  ) を一定 (  $S / S_0 = 1$  ) と近似する方法である。すなわち、第一の方法は、蓄積された核燃料物質 1 3 内の中性子源の強度が測定開始時点 ( 起点となる時点  $t_0$  ) とこの開始時点以降の或る測定時点 t で一定であると仮定して、式 ( 4 ) において未知の中性子源強度  $S_0$  及び中性子源強度 S を消去する方法である。

30

【 0 0 4 0 】

【数 5】

$$C = \frac{\epsilon S}{1 - k_{\text{eff}}} \quad \dots (5)$$

【 0 0 4 1 】

式 ( 5 ) に示すように、中性子源強度 S は、蓄積された核燃料物質 1 3 の重量に対して比例関係にあるが、臨界付近 ( 図 3 の矢印 2 2 の位置 ) において急激に増加するため、中性子源強度 S の変化は中性子計数率 C の変化に比べて無視することができる。

40

【 0 0 4 2 】

中性子源強度 S を求める第二の方法は、中性子源強度 S が蓄積された核燃料物質 1 3 に含まれる或る放射性核種 ( 例えば、Cs - 137 ) の線のピーク値と比例すると近似する方法である。冷却水 1 2 が流れる配管 1 0 内に設けられたストレナ 1 1 内に、冷却水 1 2 に含まれた核燃料物質 1 3 が蓄積されるに伴って、得られた線スペクトル分布における、蓄積された核燃料物質 1 3 に含まれる放射線核種から放出される線の計数率のピークが増加していく。また、中性子源強度 S も同様に増加する。そこで、或る測定時点 t での線計数率のピーク値を  $m_{\text{max}}$ 、及び比例係数を  $\epsilon$  とし、 $S = \epsilon m_{\text{max}}$  の関係があると仮定する。この場合、式 ( 4 ) における  $S / S_0$  は、 $S / S_0 = m_{\text{max}} / m_{\text{max}0}$

50

$0_{max} = max / 0_{max}$ と求められる。すなわち、 $S / S_0$ は線のピーク値から算出される。

【0043】

中性子強度 $S$ は、中性子計測装置の出力である中性子検出信号に基づいて求められる中性子計数率 $C$ に基づいて単純に見積もることができない。この理由を以下に述べる。中性子強度 $S$ は、冷却水12に含まれる核燃料物質の蓄積量に比例して増加するが、その蓄積により中性子実効増倍率 $k_{eff}$ も増加する。中性子実効増倍率 $k_{eff}$ が増加して1に近づくと、式(5)の $1 / (1 - k_{eff})$ 項は、1000倍、10000倍...となるため、中性子計数率 $C$ は中性子実効増倍率 $k_{eff}$ の値に大きく影響を受ける。したがって、中性子計数率 $C$ と中性子強度 $S$ を単純に関連付けることはできない。

10

【0044】

複数の或る測定時点 $t$ におけるそれぞれの中性子実効増倍率の逆数 $1 / M$ を、式(4)を用いて算出する。例えば、中性子の測定開始時点である基点となる時点 $t_0$ から経過時間が異なる測定時点 $t_1$ 、 $t_2$ 及び $t_3$ におけるそれぞれの逆数 $1 / M$ を求めることを想定する。測定時点 $t_1$ における逆数 $1 / M_1$ は、式(4)の $C_0$ に時点 $t_0$ での中性子計数率 $C_0$ の値を、式(4)の $k_0$ に時点 $t_0$ での中性子増倍率 $k_0$ の値を、及び式(4)の $C$ に測定時点 $t_1$ での中性子計数率 $C_1$ の値をそれぞれ代入する。なお、中性子増倍率 $k_0$ は、測定開始時点(時点 $t_0$ )における中性子増倍率であり、 $k_0 = 0$ と仮定する。本実施例では、 $S / S_0$ を第二の方法で求めるので、時点 $t_0$ での例えば $C_{s-137}$ の線計数率のピーク値 $0_{max}$ 及び測定時点 $t_1$ での $C_{s-137}$ の線計数率のピーク値 $1_{max}$ を用いて $1_{max} / 0_{max}$ を算出する。この算出はデータ処理装置4で行われる。 $1_{max} / 0_{max}$ の値を式(4)の $S / S_0$ に代入する。データ処理装置4は、これらの値を代入した式(4)により、測定時点 $t_1$ における中性子実効増倍率の逆数 $1 / M_1$ を算出する。

20

【0045】

測定時点 $t_2$ における中性子実効増倍率の逆数 $1 / M_2$ は、逆数 $1 / M_1$ を算出すると同様に式(4)に中性子計数率 $C_0$ 及び中性子増倍率 $k_0$ を代入し、式(4)の $C$ に測定時点 $t_2$ での中性子計数率 $C_2$ の値をそれぞれ代入し、 $S / S_0$ に $2_{max} / 0_{max}$ の値を代入する。 $2_{max}$ は測定時点 $t_2$ における $C_{s-137}$ の線計数率のピーク値である。測定時点 $t_3$ における中性子実効増倍率の逆数 $1 / M_3$ も、同様に、式(4)に測定時点 $t_3$ での中性子計数率 $C_3$ の値及び $3_{max} / 0_{max}$ の値等を代入することにより算出される。 $3_{max}$ は測定時点 $t_2$ における $C_{s-137}$ の線計数率のピーク値である。

30

【0046】

逆数 $1 / M_1$ はステップ1(図4参照)での中性子実効増倍率の逆数の値であり、同様に、逆数 $1 / M_2$ はステップ2での中性子実効増倍率の逆数の値、及び $1 / M_3$ はステップ3での中性子実効増倍率の逆数の値となる。測定時点 $t_3$ 以降の測定時点 $t_4$ 及び $t_5$ 等におけるそれぞれの中性子実効増倍率の逆数 $1 / M$ の値を算出しても良い。

【0047】

さらに、データ処理装置4は、測定開始時点 $t_0$ 及び測定時点 $t_1$ 、 $t_2$ のそれぞれの時点における、ストレーナ11内に蓄積された核燃料物質13の重量 $W_0$ 、 $W_1$ 及び $W_2$ を、前述したように、それぞれの時点での $C_{s-137}$ のピークの線計数率に基づいて算出する。

40

【0048】

データ処理装置4は、例えば、中性子実効増倍率の逆数 $1 / M_0$ 、 $1 / M_1$ 及び $1 / M_2$ のそれぞれの値、及び核燃料物質13の重量 $W_0$ 、 $W_1$ 及び $W_2$ のそれぞれの値を用いて、最小二乗法により核燃料物質13の重量と中性子実効増倍率の逆数の関係を示す逆増倍曲線(図4において実線で示された曲線)の式を求める。得られた逆増倍曲線の式を用いて、データ処理装置4は、中性子実効増倍率の逆数 $1 / M = 0$ になるときの、ストレーナ11内に蓄積された核燃料物質13の重量を算出する。中性子実効増倍率の逆数 $1 / M$

50

= 0 になるときの核燃料物質 1 3 の重量が、臨界点での核燃料物質 1 3 の重量  $W_c$  である。

【 0 0 4 9 】

データ処理装置 4 で求められた核燃料物質 1 3 の重量  $W_c$ 、さらに、臨界点前の測定時点  $t_1$  及び  $t_2$  でのストレナ 1 1 内に蓄積された核燃料物質の重量  $W_1$  及び  $W_2$  のそれぞれの情報が、データ処理装置 4 から表示装置 5 に出力され、表示装置 5 に表示される。オペレータは、表示された各核燃料物質の重量を見ることによって、ストレナ 1 1 内に蓄積された核燃料物質 1 3 の未臨界の状態を確認することができる。データ処理装置 4 は、ストレナ 1 1 内に蓄積された核燃料物質 1 3 の重量が、臨界点の核燃料物質の重量  $W_c$  に対して余裕を持って設定された核燃料物質の設定重量（核燃料物質の重量  $W_c$  よりも小さい値）まで増加したとき、警報情報を発生し、この警報情報を表示装置 5 に表示させる。警報情報は、音声情報とし、スピーカに出力されても良い。

10

【 0 0 5 0 】

また、データ処理装置 4 から出力された警報情報が制御装置（図示せず）に入力され、この制御装置は、ボロン溶液を貯蔵したタンクに接続されたボロン溶液注入管に設けられた弁を開いてボロン溶液注入管に設けられた注入ポンプを駆動する。これらの操作により、タンク内のボロン溶液が配管 1 0 内に注入され、ボロン溶液に含まれるボロン 1 0 がストレナ 1 1 内に蓄積された核燃料物質 1 3 から放出される中性子を吸収する。このため、ストレナ 1 1 に蓄積された核燃料物質 1 3 が臨界状態になることを回避することができる。また、出力された上記の警報情報に基づいて上記の制御装置が、配管 1 0 に設けられたポンプ（図示せず）の運転を停止して、ストレナ 1 1 への冷却水の供給を停止させる。また、警報情報発生時に、配管 1 0 に設けられた弁（図示せず）を全閉状態にしても良い。

20

【 0 0 5 1 】

本実施例では、冷却水 1 2 に核燃料物質 1 3 が流出する事故が万が一発生した場合においても、原子力プラントの、冷却水 1 2 に含まれる核燃料物質 1 3 が蓄積される箇所（例えば、配管 1 0 内に設けられたストレナ 1 1）に蓄積された核燃料物質 1 3 から放出される線を  $LaBr_3(Ce)$  検出器 3 で検出し、 $LaBr_3(Ce)$  検出器 3 から出力された線検出信号に基づいて求められた線計数率を用いて線スペクトル分布の情報を作成し、線スペクトル分布の情報に含まれる或る放射性核種（例えば、 $Cs-137$ ）のピークの線計数率を用いてストレナ 1 1 内に蓄積された核燃料物質 1 3 の重量を求めている。さらに、本実施例では、ストレナ 1 1 内に蓄積された核燃料物質 1 3 から放出される、自発核分裂性物質の自発核分裂により発生する中性子が  $He-3$  比例計数管 2 で検出され、 $He-3$  比例計数管 2 から出力された中性子検出信号に基づいて中性子計数率が求められる。

30

【 0 0 5 2 】

さらに、各測定時点に対応して得られた中性子計数率等の値を、前述したように、式（4）に代入して、すなわち、中性子逆増倍法により、各測定時点における中性子実効増倍率の逆数  $1/M$  を算出する。算出された各中性子実効増倍率の逆数  $1/M$  の値、及び各測定時点における、算出された核燃料物質の重量に基づいて、中性子実効増倍率の逆数  $1/M$  が 0 になる時点（臨界点）で蓄積される核燃料物質の重量  $W_c$  が求められる。

40

【 0 0 5 3 】

このように、本実施例によれば、中性子計数率を用いて求めた、ストレナ 1 1 内に蓄積された核燃料物質 1 3 の重量、及び中性子実効増倍率の逆数  $1/M$  に基づいて、臨界点において蓄積される核燃料物質の重量  $W_c$  をより精度良く求めることができる。このため、冷却水 1 2 に核燃料物質 1 3 が流出する事故が万が一発生した場合においても、本実施例は、原子力プラントの系統内の、冷却水 1 2 に含まれる核燃料物質 1 3 が蓄積される箇所に蓄積された核燃料物質 1 3 の未臨界状態をより精度良く監視することができる。

【 0 0 5 4 】

本実施例では、配管 1 0 内に設けられたストレナ 1 1 に蓄積された核燃料物質 1 3 か

50

ら放出される線を  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  検出器 3 で検出し、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  検出器 3 から出力された線検出信号に基づいて求められた線計数率を用いて線スペクトル分布の情報を作成し、線スペクトル分布の情報に含まれる或る放射性核種（例えば、 $\text{Cs}-137$ ）のピークの線計数率を用いてストレナ 11 内に蓄積された核燃料物質 13 の重量を求めているので、時間の経過と共に蓄積量に変化してその蓄積量が分からないストレナ 11 内の核燃料物質 13 の重量をより精度良く把握することができる。

【0055】

従来の一般的な中性子逆増倍法を適用し、逆増倍曲線の外挿により核燃料物質の予測臨界量を推定する場合には、中性子計数率の測定値のみを用いており、もし、中性子の増倍があった場合においても、中性子計数率の急激な上昇に基づいて臨界になることを予測するしかなかった。このため、従来例では、原子力プラントの或る箇所に蓄積された核燃料物質の臨界を精度良く監視することができなかつた。

10

【0056】

本実施例では、蓄積された核燃料物質から放出された中性子の検出により測定された中性子計数率、及び蓄積された核燃料物質の重量（本実施例では線検出器である  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  検出器 3 から出力された線検出信号に基づいて算出された、核燃料物質の重量）を用いて蓄積された核燃料物質の臨界を精度よく予測することができるので、蓄積された核燃料物質の未臨界状態をより精度良く監視することができる。

【0057】

後述の実施例 2 及び 3 では、核燃料物質の重量と共に核燃料物質に含まれる混合物の重量も併せて求めてしまう。蓄積された核燃料物質から放出される線に基づいて核燃料物質の重量を求めている本実施例は、蓄積された核燃料物質の重量を後述の実施例 2 及び 3 よりも精度良く求めることができる。このため、本実施例は、実施例 2 及び 3 よりも、蓄積された核燃料物質の未臨界状態を精度良く監視することができる。

20

【実施例 2】

【0058】

本発明の他の実施例である実施例 2 の核燃料物質の臨界監視方法を、図 5 を用いて説明する。

【0059】

本実施例の核燃料物質の臨界監視方法に用いられる臨界監視装置 1A は、実施例 1 で使用される臨界監視装置 1 において  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  検出器 3 をロードセル（荷重計測装置）6 に替えた構成を有する。ロードセル 6 はデータ処理装置 4 に接続される。臨界監視装置 1A の他の構成は臨界監視装置 1 と同じである。

30

【0060】

ロードセル 6 は容器であるキャニスタ 14 内に設置され、核燃料物質を移送する吸引ホース 15 がキャニスタ 14 に接続される。

【0061】

原子力プラントにおいて、原子炉圧力容器内の炉心に装荷されている燃料棒から冷却水中に核燃料物質が流出する事故が万が一発生し、原子力プラント内の冷却水が流れる有る箇所に、その核燃料物質 16 が蓄積された場合を想定する。その箇所に蓄積された核燃料物質 16 は、吸引ホース 15 を通して冷却水と共にキャニスタ 14 内に移送される。キャニスタ 14 内にはストレナ（図示せず）が設置されており、このストレナにより冷却水が分離される。この結果、核燃料物質 16 はロードセル 6 の上に溜まる。ロードセル 6 は、溜まったその核燃料物質 13 の重量を計測する。ロードセル 6 で測定された核燃料物質 13 の重量の情報がデータ処理装置 4 に入力される。

40

【0062】

ロードセル 6 によって核燃料物質 16 の重量が測定されているとき、 $\text{He}-3$  比例計数管 2 が、キャニスタ 14 内の核燃料物質 13 に含まれる自発核分裂性物質（例えば、キュリウム）から放出される中性子を検出し、中性子検出信号を出力する。この中性子検出信号は、データ処理装置 4 に入力される。データ処理装置 4 は、中性子検出信号に基づいて

50

中性子計数率を求め、実施例 1 と同様に、この中性子計数率等を式 ( 4 ) に代入して用いて中性子実効増倍率の逆数  $1 / M$  を求める。さらに、データ処理装置 4 は、各核燃料物質 1 3 の重量及び各中性子実効増倍率の逆数  $1 / M$  に基づいて逆増倍曲線の式を求め、この逆増倍曲線の式を用いて中性子実効増倍率の逆数  $1 / M$  が 0 になる臨界点における核燃料物質の重量  $W_c$  を算出する。算出された核燃料物質の重量  $W_c$  及び各測定時点での核燃料物質の重量の情報が表示装置 5 に表示される。

【 0 0 6 3 】

本実施例は、実施例 1 で生じる各効果を得ることができる。

【実施例 3】

【 0 0 6 4 】

本発明の他の実施例である実施例 3 の核燃料物質の臨界監視方法を、図 6 を用いて説明する。

【 0 0 6 5 】

本実施例の核燃料物質の臨界監視方法に用いられる臨界監視装置 1 B は、実施例 1 で使用される臨界監視装置 1 において  $LaBr_3(Ce)$  検出器 3 を差圧計 7 に替えた構成を有する。臨界監視装置 1 A の他の構成は臨界監視装置 1 と同じである。

【 0 0 6 6 】

差圧計 7 はデータ処理装置 4 に接続される。配管 1 0 内に設けられたストレーナ 1 1 よりも上流で配管 1 0 内に開口する圧力管、及び配管 1 0 内に設けられたストレーナ 1 1 よりも下流で配管 1 0 内に開口する他の圧力管が、圧力計 7 に接続される。

【 0 0 6 7 】

冷却水 1 2 に核燃料物質 1 3 が流出する事故が万が一発生した場合には、核燃料物質 1 3 を含む冷却水 1 2 が配管 1 0 内を流れる。冷却水 1 2 がストレーナ 1 1 を通過するため、冷却水 1 2 に含まれる核燃料物質 1 3 が、実施例 1 と同様に、ストレーナ 1 1 に捕捉され、ストレーナ 1 1 内に蓄積される。ストレーナ 1 1 内に核燃料物質 1 3 が蓄積されると、核燃料物質 1 3 の蓄積量に対応してストレーナ 1 1 の上流とストレーナ 1 1 の下流で圧力差が生じる。差圧計 7 は、ストレーナ 1 1 の上流側での配管 1 0 内の圧力とストレーナ 1 1 の下流側での配管 1 0 内の圧力の差を検出し、検出した差圧の情報をデータ処理装置 4 に出力する。差圧計 7 で計測された差圧は、ストレーナ 1 1 内に蓄積された核燃料物質 1 3 の重量と相関関係にある。蓄積された核燃料物質 1 3 の重量が増加すると、差圧計 7 で計測された差圧も増加する。データ処理装置 4 は、入力した差圧の計測値に基づいて蓄積された核燃料物質の重量を算出する。

【 0 0 6 8 】

差圧計 7 によってストレーナ 1 1 の上流と下流の圧力差が計測されているとき、 $He-3$  比例計数管 2 が、ストレーナ 1 1 内に蓄積された核燃料物質 1 3 に含まれる自発核分裂性物質 (例えば、キュリウム) から放出される中性子を検出し、中性子検出信号を出力する。この中性子検出信号は、データ処理装置 4 に入力される。データ処理装置 4 は、中性子検出信号に基づいて中性子計数率を求め、実施例 1 と同様に、この中性子計数率等を式 ( 4 ) に代入して用いて中性子実効増倍率の逆数  $1 / M$  を求める。さらに、データ処理装置 4 は、算出した各核燃料物質 1 3 の重量及び各中性子実効増倍率の逆数  $1 / M$  に基づいて逆増倍曲線の式を求め、この逆増倍曲線の式を用いて中性子実効増倍率の逆数  $1 / M$  が 0 になる臨界点における核燃料物質の重量  $W_c$  を算出する。算出された核燃料物質の重量  $W_c$  及び各測定時点での核燃料物質の重量の情報が表示装置 5 に表示される。

【 0 0 6 9 】

本実施例は、実施例 1 で生じる各効果を得ることができる。本実施例は、差圧計 7 で計測した差圧に基づいて核燃料物質の重量を求めているので、実施例 1 における線検出器 (例えば、 $LaBr_3(Ce)$  検出器)、及び実施例 2 におけるロードセル 6 及びキャニスタ 1 4 が不要であり、単純な構成で蓄積された核燃料物質の重量を求めることができる。

【符号の説明】

10

20

30

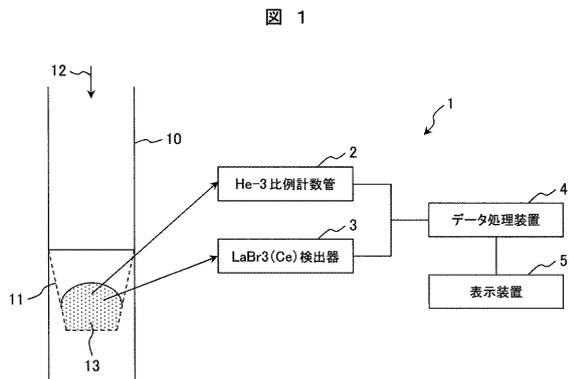
40

50

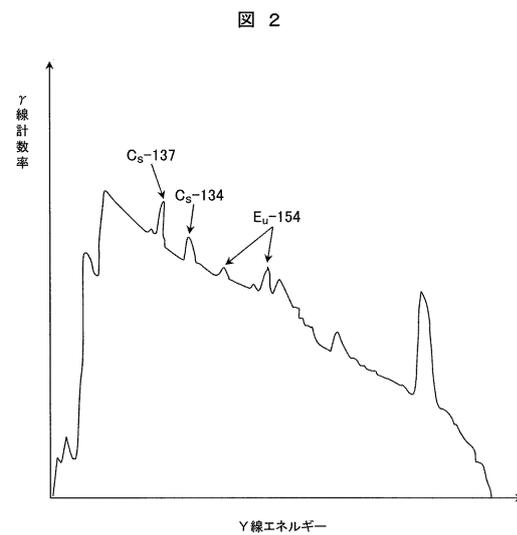
【 0 0 7 0 】

1, 1A, 1B... 臨界監視装置、2... He-3 比例計数管 (中性子検出装置)、3... LaBr<sub>3</sub>(Ce) 検出器 (γ線検出装置)、4... データ処理装置、6... ロードセル、7... 差圧計、10... 配管、11... ストレーナ、12... 冷却水、13... 核燃料物質、14... キャニスタ。

【 図 1 】

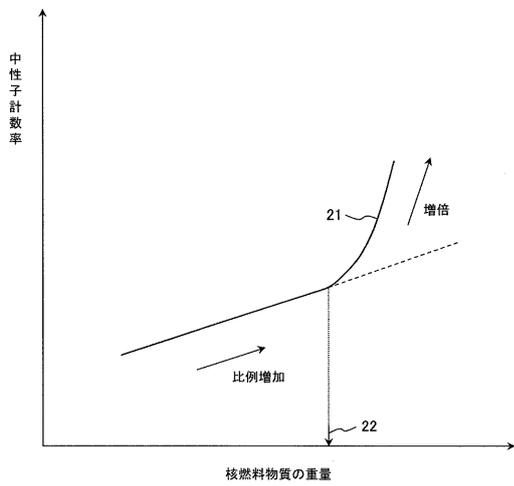


【 図 2 】



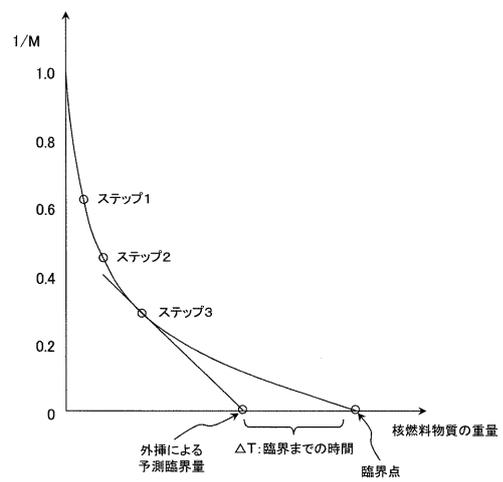
【図3】

図3



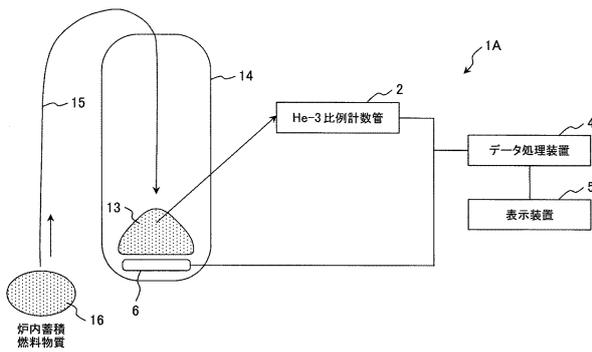
【図4】

図4



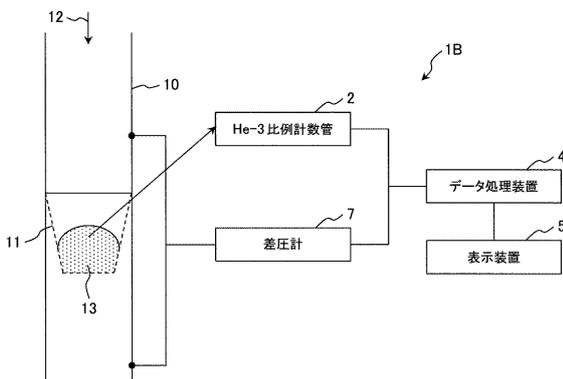
【図5】

図5



【図6】

図6



## フロントページの続き

- (72)発明者 近藤 貴夫  
茨城県日立市幸町三丁目1番1号 日立GEニュークリア・エナジー株式会社内
- (72)発明者 伏見 篤  
茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所 日立研究所内
- (72)発明者 上野 克宜  
茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所 日立研究所内
- (72)発明者 岡嶋 成晃  
茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 独立行政法人日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター 原子力科学研究所内

審査官 西村 直史

- (56)参考文献 特開昭62-293194(JP,A)  
特開昭62-096897(JP,A)  
米国特許出願公開第2004/0101082(US,A1)  
特開2012-112862(JP,A)  
特開2008-232834(JP,A)  
特開平02-128200(JP,A)  
特開昭60-115899(JP,A)  
特開昭51-068148(JP,A)  
特開平04-269697(JP,A)  
特開2007-303942(JP,A)  
特開平04-184197(JP,A)  
特開2012-098311(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
G21C 17/06